

(54) 不連続性岩盤の圧縮応力下における 破壊メカニズムに関する一考察

(株)大林組東京本社 正会員 ○武内 邦文
マサチューセッツ工科大学 H.H.EINSTEIN

Note on Fracturing Mechanisms of Jointed Rock under Compressive Stress State

K.TAKEUCHI (Obayashi Corporation)
H.H.EINSTEIN(Massachusetts Institute of Technology)

ABSTRACT

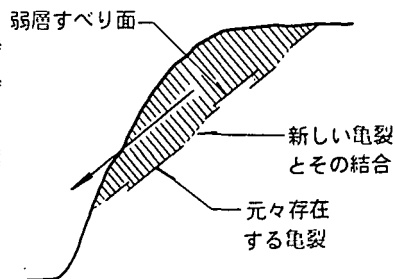
The objective of this study is to understand micro-scale fracturing mechanisms of granular brittle material like rock under compressive stress state. Uniaxial compression loading tests using center-cracked prismatic gypsum specimens were performed and micro fracture initiations at pre-existing crack tips were observed by a microscope.

In conclusion, typical tensile and shear fractures were clearly recognized at crack tips, which depend on crack angles. Both tensile and shear fracture initiation angles can be reasonably estimated by the Maximum Hoop Stress Criterion and the Maximum Shear Stress Criterion. However, mixed-mode fracture toughnesses obtained by laboratory experiments do not coincide with the theoretical ones.

1. はじめに

岩盤は、鉱物学的スケールのフィッシャーから、節理、層理、亀裂、そしてより大きなスケールの破碎帯や断層等多くの不連続面を内在している。従って、応力の変化等により元々存在するクラックからどのように新しい亀裂が発生(Fracture Initiation)し、進展(Propagation)して、最終的にクラックどうしが結合し、図-1に示すような弱層すべり面がいかに形成されるかを予測することが岩盤工学上重要となる。

グリフィスの理論に端を発する脆性材料の破壊力学的(Fracture Mechanics)な手法¹⁾は、その後の飛躍的な理論的展開^{2), 3), 4)}と同時に、コンクリートや岩盤材料にも応用されてきている^{5), 6), 7), 8)}。特に、これらの材料は主として圧縮応力が支配的な場において利用されるため、初期段階から圧縮応力下における新しい亀裂の発生と進展に着目され、この力学挙動へのグリフィス理論の適用性や複数クラックが存在する場合の亀裂結合等が研究されてきた^{7), 8), 9), 10)}。



本論では、圧縮応力の増加に伴い元々存在するクラック端部からいかに新しい亀裂が発生するかを明確にすることを目的として、人工クラックを含む不連続性岩盤を模擬した試料を用いて実施した室内試験の結果と、計算結果とを比較しながら亀裂の発生について考察した結果を報告する。

2. 試験の概要^{1), 12), 13)}

2. 1 試験体および載荷方法

試験体の形状は図-2に示すように、中央部に不連続面を模擬した長さ12.8mm、厚さ0.2mmのクラックを有する縦15.36cm、横7.68cm、厚さ約2.4cm程度の立方体とした。この供試体の材料は石苳(水石苳比=0.4、水セライト比=35.0)で、クラックはモールドに厚さ約0.1mmの鋼製極薄板を2枚束ねて事前に固定しておき、

モールド中に石膏を流入後適切な時期にその薄板を引き抜いて作成した。

荷重載荷方法は一軸圧縮試験とし、微小な変位を制御可能な試験機(INSTRON Model 1331)を用いて、各ステップ変位を0.15-0.005mmに制御した。その各ステップ毎の亀裂の観察は最大倍率40倍の顕微鏡(カメラ付き)で目視観察した。なお、圧縮試験中に中央部のクラック面が閉塞し接触しないことを確認している。

2. 2 供試体の材料特性

石膏の材料特性を把握するため、円柱供試体を使用した一軸圧縮試験および割裂引張試験を実施した。また、モードIとモードIIの破壊靱性(フラクチャータフネス)を比較的容易に評価できる方法として図-3に示す円板試験法¹⁴⁾を採用して、亀裂長さを3種類(6.4mm, 12.8mm, 25.6mm)変化させた場合の石膏の破壊靱性試験を実施した。その得られた試験結果を表-1にまとめた。

表-1 石膏の材料特性一覧

圧縮強度	引張強度
$\sigma_c = 36.2 \text{ MPa}$	$\sigma_t = 1.9 \text{ MPa}$
モードI破壊靱性	モードII破壊靱性
$K_{Ic} = 0.223 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$	$K_{IIc} = 0.338 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$

2. 3 試験ケース

試験は図-2に示す主応力軸からのクラックの傾き α を0度から90度まで10度ピッチで変化させた場合の試験体を作成し、一軸圧縮試験を実施した場合のクラック端部からの新しい亀裂の発生状況を観察した。その試験体のケース番号とクラックの傾きおよび主な試験結果を表-2にまとめた。

3. 試験結果および考察

3. 1 主な試験結果および亀裂発生日視観察結果

それぞれのケースについて試験した主な結果を表-2にまとめた。この表中で混合モード破壊靱性値とは破壊力学に基づく(1)式(一軸試験の場合)により試験結果から算定した値である。

$$K_I = -\frac{\sqrt{\pi a}}{2} (1 - \cos 2\alpha) \quad (1)$$

$$K_{II} = -\frac{\sqrt{\pi a}}{2} \sin 2\alpha$$

ここに、 σ : 亀裂発生時の一軸圧縮応力
 a : クラック長さの半分
 α : クラックの傾き

顕微鏡による観察結果として捉えられた明瞭な亀裂のうち最も典型的な引張亀裂を図-4に示した。これは、引張応力により剝離したため明確なトレース跡を有し、亀裂面は概ねスムーズであると推定される。一方、図-5は典型的なせん断亀裂であり、この亀裂面はその成因からかなりラフであると推定される。その他の亀裂としては疑似引張亀裂や圧潰等の形態がクラック端部で観察されたが、いずれも明瞭な亀裂ではなかった。

従来からのPMMAやレジン等のプラスチック系材料、グラファイト、石膏やセメントコンクリート系材料、および岩石等を用いた研究例では、圧縮応力下において発生する亀裂も、引張応力下と同じく、主として引張亀裂が発生し、それらが結合して全体として試験体の破壊に至るという報告が多かった。例外として、Lajtai¹⁵⁾が図-6に示すようなせん断領域の存在やクラック端部からのせん断亀裂の発生を示唆した。本研究における亀裂目視観察結果として重要な結論は、クラックの傾き α によりその端部からマイクロレベルの引張亀裂と共にせん断亀裂の発生を捉えたことである。

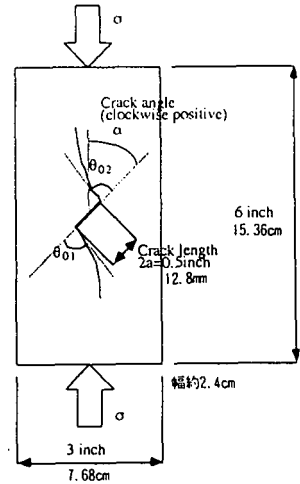


図-2 試験体の形状寸法

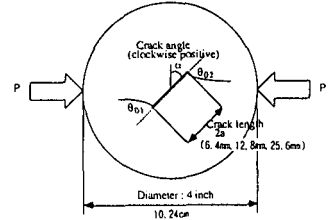


図-3 円板試験法

表-2 主な試験結果一覧

試験ケース	クラックの傾き α (度)	亀裂タイプ	混合モード破壊靱性値		亀裂発生角度	
			K_{II} (MPa $\sqrt{m}$)	K_I (MPa $\sqrt{m}$)	θ_{01} (度)	θ_{02} (度)
B-0-50	0	微小亀裂は全く発生せず、急激な脆性破壊が生じ供試体が破壊				
B-10-50	10	せん断亀裂	-0.079	-0.449	-21	—
B-20-50	20	せん断亀裂	-0.293	-0.805	3	9
B-30-50	30	疑似引張亀裂	-0.853	-1.478	79	54
B-40-50	40	疑似引張亀裂 せん断亀裂	-0.854 -0.854	-1.018 -1.018	79 —	— 33
B-50-50	50	引張亀裂 疑似引張亀裂	-1.165 -1.256	-0.978 -1.054	— 106	108 —
B-60-50	60	引張亀裂	-1.338	-0.772	111	113
B-70-50	70	引張亀裂	-1.369	-0.498	114	116
B-80-50	80	引張亀裂	-1.293	-0.228	120	116
B-90-50	90	引張亀裂	-1.648	0.0	—	—

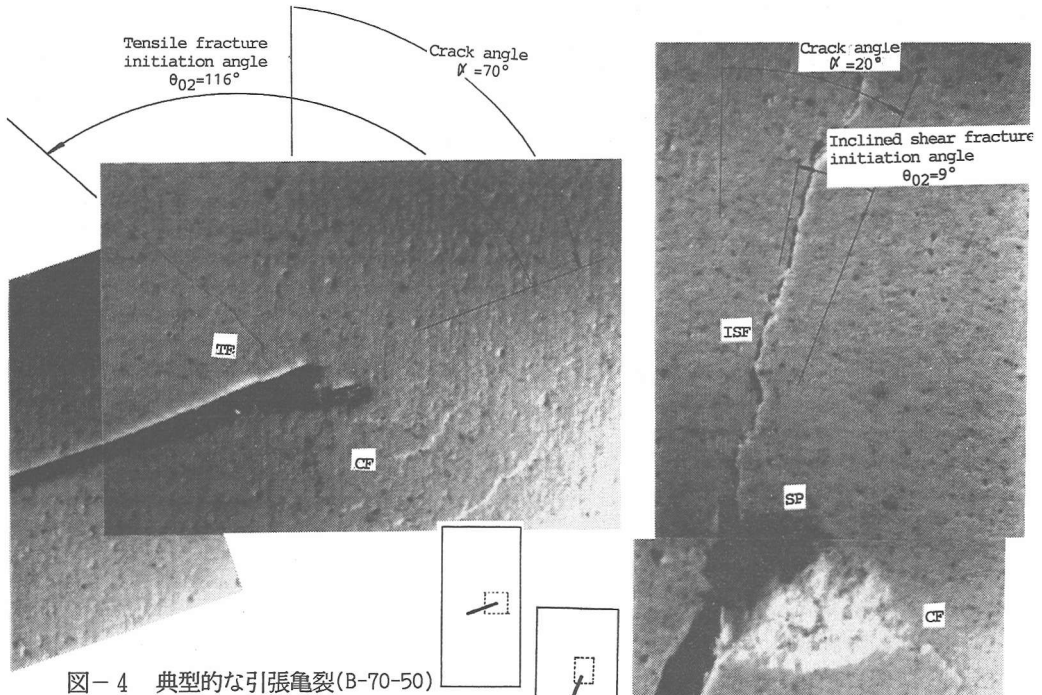


図-4 典型的な引張亀裂(B-70-50)

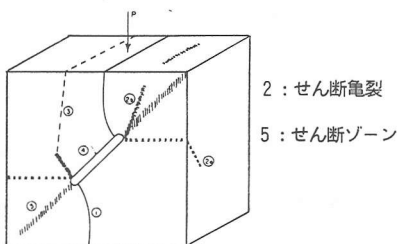


図-6 圧縮応力下での亀裂発生形態¹⁵⁾

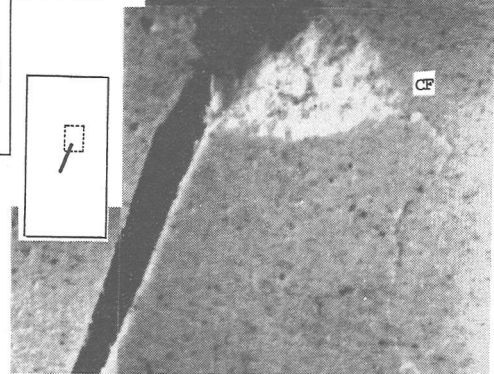


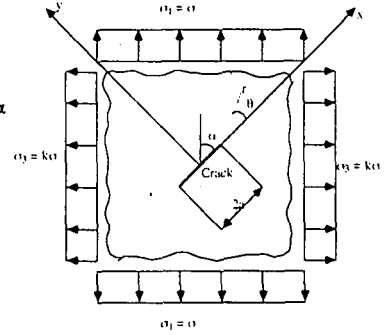
図-5 典型的なせん断亀裂(B-20-50)

3. 2 亀裂発生解析とその試験結果との比較

Eftis⁴⁾ らは図-7に示す二軸応力状態におけるクラック端部の応力を(2)式のとおり導いた。

$$\begin{aligned}\sigma_x &= \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left[1 - \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right] - \frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} \sin \frac{\theta}{2} \left[2 + \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2} \right] + \sigma(1-k) \cos 2\alpha \\ \sigma_y &= \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left[1 + \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right] + \frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2} \\ \tau_{xy} &= \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2} + \frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left[1 - \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right]\end{aligned}\quad (2)$$

ここに、 $K_I = \frac{\sigma\sqrt{\pi a}}{2} [(1+k) - (1-k)\cos 2\alpha]$ k : Biaxial stress ratio ($=\sigma_3/\sigma_1$)
 $K_{II} = \frac{\sigma\sqrt{\pi a}}{2} (1-k)\sin 2\alpha$



また、極座標系におけるフープ応力と最大せん断応力を(3)および(4)式の通り導いた。

$$\frac{\sigma_\theta}{\sigma} = \sqrt{\frac{a}{32r}} \{ B_1(\alpha, k) \left[\sin \frac{\theta}{2} + \sin \frac{3\theta}{2} \right] + B_2(\alpha, k) \left[3\cos \frac{\theta}{2} + \cos \frac{3\theta}{2} \right] + B_3(\alpha, k) \sin^2 \theta \} \quad (3)$$

ここに、 $B_1(\alpha, k) = -3(1-k)\sin \alpha \cos \alpha$ $B_2(\alpha, k) = k + (1-k)\sin^2 \alpha$ $B_3(\alpha, k) = (1-k)\cos 2\alpha$

$$\begin{aligned}\left\{ \left(\frac{\tau_m}{\sigma} \right)^2 - \left[\frac{(1-k)\cos 2\alpha}{2} \right]^2 \right\} \left(\frac{r}{a} \right) + \frac{1}{4\sqrt{2}} \{ & [(1-k^2)\cos 2\alpha - (1-k)^2\cos^2 2\alpha] F_1(\theta) \\ & + [(1-k)^2\sin 4\alpha] F_2(\theta) \} \left(\frac{r}{a} \right)^{\frac{1}{2}} - \frac{r}{32} \{ & [(1+k)^2 - 2(1-k^2)\cos 2\alpha + (1-k)^2\cos^2 2\alpha] F_3(\theta) \\ & + [(1-k)^2\sin^2 2\alpha] F_4(\theta) + [4(1-k^2)\sin 2\alpha - 2(1-k)^2\sin 4\alpha] F_5(\theta) \} = 0\end{aligned}\quad (4)$$

ここに、 $F_1(\theta) = \sin \theta \sin \frac{3\theta}{2}$ $F_2(\theta) = \sin \theta \cos \frac{3\theta}{2} + 2\sin \frac{\theta}{2}$ $F_3(\theta) = \sin^2 \theta$ $F_4(\theta) = 4 - 3\sin^2 \theta$
 $F_5(\theta) = \sin \theta \cos \frac{\theta}{2}$

クラック端部からの引張亀裂の発生について、同じくEftis⁴⁾ らは(5)式で示される最大フープ応力説を提案し、この条件を満たす角度 θ_0 方向に引張亀裂が発生すると考えた。これを参考に、せん断亀裂については同じような考え方から(6)式に示す最大せん断応力説を筆者らが提案し、せん断応力が最大となる角度 θ_0 方向にせん断亀裂が発生すると考えた。

$$[\sigma_\theta]_{\theta_0} > 0 \quad \left[\frac{\partial \sigma_\theta}{\partial \theta} \right]_{\theta_0} = 0 \quad \left[\frac{\partial^2 \sigma_\theta}{\partial \theta^2} \right]_{\theta_0} < 0 \quad (5)$$

$$|\tau_m|_{\theta_0} \rightarrow \text{Max.} \quad \left[\frac{\partial \tau_m^2}{\partial \theta} \right]_{\theta_0} = 0 \quad \left[\frac{\partial^2 \tau_m^2}{\partial \theta^2} \right]_{\theta_0} < 0 \quad (6)$$

これらの解析から得られた亀裂発生角度と試験で得られたその角度をクラックの傾き α を横軸にして比較整理した結果を、引張亀裂については図-8に、せん断亀裂については図-9に示した。この結果から、亀裂発生角度については引張、せん断とも概ねこれらの理論で予測できるものと評価される。ただし、ここでは図を載せなかったが、引張およびせん断亀裂の発生に関し上記の理論式から求められる混合モード破壊靱性曲線と試験から得られた破壊靱性値は一致せず今後の課題として残された。

4. まとめ

本研究では、圧縮応力下におけるクラック端部からいかに新しい亀裂が発生するかを目的に試験と解析を実施した結果、主に以下の結論が得られた。

①顕微鏡による亀裂観察の結果、クラックの傾きにより典型的な亀裂である引張亀裂と共にマイクロレベルでのせん断亀裂の発生を捉えた。

②これらの亀裂発生角度については、引張亀裂については最大フープ応力説で、せん断亀裂については最大せん断応力説で予測可能と評価された。ただし、混合モードの破壊靱性曲線については、引張およびせん断の場合とも解析と試験結果は一致しなかった。

③この原因はクラック端部の塑性化やひずみ軟化に伴う応力低下等が考えられ、その解決案としてはひずみベースの破壊基準の採用等がある。¹¹⁾

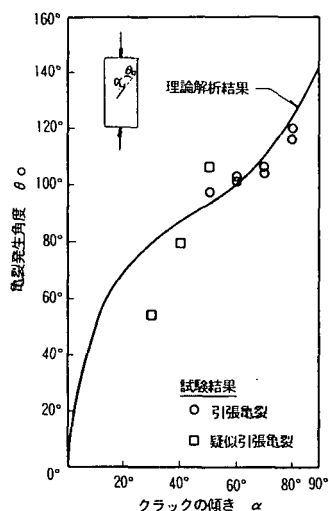


図-8 引張亀裂発生角度の比較結果

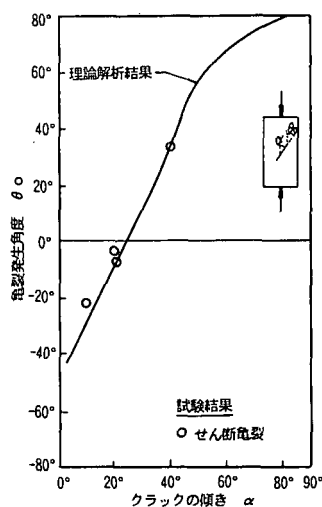


図-9 せん断亀裂発生角度の比較結果

(参考文献)

- 1) A.A.Griffith(1920), The phenomena of rupture and flow in solids, Philosophical Transactions of the Royal Society, A221, pp.861-906
- 2) F.Erdogan and G.C.Sih(1963), On the crack extension in plates under plane loading and transverse shear, ASME J. of Basic Engineering, Vol.85, pp.519-527
- 3) G.C.Sih(1974), Strain-energy-density factor applied to mixed mode crack problems, Int. J. of Fracture, Vol.10, pp.305-321
- 4) J.Eftis and N.Subramonian(1978), The inclined crack under biaxial load, Engineering Fracture Mechanics, Vol.10, pp.43-67
- 5) A.Carpinteri(edt.,1986), Mechanical damage and crack growth in concrete : Plastic collapse to brittle fracture, Martinus Nijhoff Publishers
- 6) 佐藤千之助、車田亮、小野瀬健太郎、今泉水城、福沢公夫、沼尾達弥(1988)、コンクリートの圧縮応力下における破壊力学的性質に関する研究、茨城大学工学部研究集報第36巻、PP.33-40
- 7) E.Hoek and Z.T.Bieniawski(1965), Brittle fracture propagation in rock under compression, Int. J. of Fracture Mechanics, Vol.1, pp.137-155
- 8) Z.T.Bieniawski(1967), Mechanism of brittle fracture of rock : Part I-III, Int. J. of Rock Mechanics and Mining Science, Vol.4, pp.395-430
- 9) H.Horii and S.Nemat-nasser(1985), Compression-induced microcrack growth in brittle solids : Axial splitting and shear failure, J. of Geophysical Research, Vol.90, pp.3105-3125
- 10) H.Horii and S.Nemat-nasser(1986), Brittle failure in compression : Splitting, faulting and brittle-ductile transition, Philo. Trans. of the Royal Society, Vol.319, pp.337-374
- 11) O.Reyes and H.H.Einstein(1991), Failure mechanisms of fractured rock - A fracture coalescence model, Proc. of 7th Int. Congress on Rock Mechanics, Vol.1, pp.333-340
- 12) O.Reyes(1991), Experimental study and analytical modelling of fracture coalescence in brittle materials, Ph.D. Thesis, Massachusetts Institute of Technology
- 13) K.Takeuchi(1991), Mixed-mode fracture initiation in granular brittle materials, M.S.Thesis, Massachusetts Institute of Technology
- 14) H.Awaji and S.Sato(1978), Combined mode fracture toughness measurement by the disk test, J. of Engineering Materials and Technology, Vol.100, pp.175-182
- 15) E.Z.Lajtai(1971), A theoretical and experimental evaluation of the Griffith theory of brittle fracture, Tectonophysics, Vol.11, pp.129-156